

Akarsu deltaları oluşumunun matematik modellenmesi

Ali AYTEK*, Necati AĞIRALIOĞLU

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Su Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Akarsular üzerine yapılan çeşitli düzenleme yapıları, bu akarsuların taşıdığı katı madde miktarını değiştirmektedir. Bu değişikliklerin olumsuz etkilerinin en belirgin olarak görüldüğü yer, akarsuların çıkış ağzlarında oluşan deltalar. Denge halinde bulunan bir akarsu kesiminde bir barajın yapılması sonucunda, baraj gölünün yukarısında, su kabarması görülen nehir kısmında, su hızı düştüğü için akarsuyun taşıdığı katı maddelerin önce iri malzemeleri çökelir. Daha sonra biraz daha ince olan kum ve çakıl gibi malzemeler baraj gölünün menba kesiminde çökelir ve bu çökelmeler delta oluşturur. Kil ve silt iriliğindeki malzemeler ise baraj gölünde akmaya devam eder ve baraj gövdesine yakın bölgede çökelirler. Böylece barajlarda üç türlü yığılma söz konusu olur. a)- suyun kabardığı akarsu kesimindeki yığılmalar, b)- kum ve çakılın oluşturduğu deltalar ve c)- kil ve siltin oluşturduğu taban yığılmaları. Yığılma şekilleri, kil malzemesinin mineral karakteristiğine ve suyun hareket şekline bağlıdır. Taban malzemesine baraj gölünün her yerinde rastlanır. Fakat en çok akım hızının düşük olduğu baraja yakın yerlerde ve su yüzünün salınım yaptığı yerlerde çökerler. Bununla beraber, bunlar tam yığılıp tabakalaşmadan önce bu ince malzemeler yoğunluk akımlarıyla hareket edebilir. Haznenin toprakla dolmasında, su yüzünün ve tabanın profillerinin nicelik olarak belirlenmesi önemlidir. Olayı matematik olarak inceleyen metotlar; su ve katı madde denklemlerinin birlikte çözüldüğü modeller ve suyun kabarması etkisinden faydalanan modellerdir. Bu çalışmada, durgun bir su ortamına deşarj olan bir akarsu deltası matematik olarak modellenmiştir. Akarsu debisi, katı madde miktarı, akarsu deltası radyal genişleme açısının akarsu deltasına etkisi matematiksel ve sayısal olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Akarsu, delta, radyal genişleme açısı, baraj, matematik model, sonlu farklar.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Ali AYTEK. aytek@gantep.edu.tr; Tel: (342) 360 12 00 dahili: 2428.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Su Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Akarsu deltaları oluşumunun matematik modellenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 08.03.2006 tarihinde dergiye ulaşmış, 05.04.2006 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.06.2007 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Mathematical modeling for river delta formation

Extended abstract

Rivers form deltas wherever they flow into a water body such as a lake, a reservoir, a sea or the ocean. All rivers transport sediment as well as water. Dam construction impacts the transport of both water and sediment. Because the great majority of rivers transport much more water than sediment, a much longer time is required to fill a reservoir with sediment than with water. As a result the gradual accumulation of sediment in reservoirs often receives less attention that it merits. Sediment deposition in a reservoir reduces its storage capacity, so limiting the effective life of the dam as well as the benefits it provides.

Natural river reaches are usual in a state of morphological equilibrium where the sediment inflow in average balances the sediment outflow. Dam constructions dramatically alter this balance due to change in the hydraulic conditions as well as trapping of the sediment in the reservoir. The storage of water and sediment has a number of various environmental impacts, which need to be investigated in the design, construction, operation and maintenance. Understanding the mechanisms of formation of deltas and the bed profiles of sediments is of fundamental importance to the fields of hydraulics, hydrology and water resources.

Deltas are cone-shaped deposits formed at the confluence of rivers with standing bodies of water. Deltas commonly display three distinct zones; (a) a low-slope topset deposit that forms as the coarse sediment load deposits on the river bed, (b) a high-slope foreset deposit (delta face) that forms as the coarse sediment load avalanches down the delta face into deeper water and (c) a low-slope bottomset deposit that forms as the fines settle out on the bed of the lake or reservoir. This structure is illustrated in Figure 1.

Rivers generally carry a broad range of sediment sizes. Here the problem is abstracted to sand-bed rivers that predominantly transport two grain sizes, sand and mud. Such rivers typically have beds that are composed almost exclusively of sand.

The mud carried by a sand-bed stream typically forms only a negligible fraction of the bed material

because its deposition on the river bed is inhibited by the relatively high ratio of boundary shear velocity to particle fall velocity.

For this reason it is often referred to as wash load. In the deltas of sand-bed streams, therefore, the topset and foreset deposits are built mostly out of sand, while the bottomset deposit consists mostly of mud. The mud may be deposited by one of three mechanisms. The first of these consists of surface plumes and the second consists of interflows. Both of these form when the sediment-laden river inflow has a density that is less than the highest density of water in the lake or reservoir. The third mechanism is a muddy bottom turbidity current which forms when the sediment-laden river inflow is sufficiently heavy to plunge.

Some assumptions and approximations are introduced in order to develop the delta formation of a river. The delta and its associated deposits are allowed to prograde in the longitudinal direction but not allowed to flare out in the transverse direction. This approach allows for a relatively simple experimental test of the model. The model can be easily generalized to a quasi 2-D laterally expanding model of river deltas in lakes and reservoirs.

The model assumes a single characteristic grain size D , which may be sand or gravel. Sediment transport calculations are based on the assumption that this size allows for a computation of bed material load, but not wash load, which is excluded from the calculation. In a gravel-bed river the bed material load is typically mostly gravel, even when the great majority of the load is sand. In a sand-bed stream the bed material load is typically mostly sand, even when the great majority of the load is mud.

The analysis presented here represents a delta formation processes in a standing water such as a lake or reservoir by using finite difference methods. Firstly one dimensional form of the delta formation is developed. Secondly two dimensional formulation is calculated according to flow regime of the river. A standing body of water is created in a river of constant width and by means of a vertical barrier (dam). The river flow upstream of the barrier is Froude-subcritical and the barrier creates an M1 backwater curve.

Keywords: River, fan delta, sediment, dam, reservoir, mathematical model, finite difference.

Giriş

Genel olarak akarsuyun akış rejimini ve katı madde taşıma kapasitesini değiştiren bir baraj, akarsudaki tabii dengeyi bozar. Hazne oluşturmak üzere akarsu üzerinde bir baraj yapılıncı suyun akış hızı azalır. Taşınan katı maddelerin çoğu, suyun kabardığı akarsu kısmında ve baraj gölünde yığılır. Bu yığılmalar hazne menba ucunda yatak seviyesini yükseltir ve bir delta (çatalağız) oluşturur.

Yığılan katı maddenin hazne içindeki dağılımının bilinmesi mühendislik için önemlidir. Bu dağılımın şekli, faydalı hacme, dip savak yüksekliğine, dinlenme ve göle girme anlarına etki eder. Bunun için belirli süreler içinde baraj gölünde ortaya çıkacak katı madde dağılımını, planlama çalışmalarında tahmin etmek gerekir.

Katı madde parçalarının iriliği ve yapısı, baraj gölünün şekli ve büyüklüğü, baraj gölüne giren ve çıkan su miktarları ve baraj haznesinin işletilmesindeki kurallar barajda yığılmalara etki eden faktörlerdir.

Baraj gölünün yukarısında, su kabarması görülen nehir kısmında, su hızı düştüğü için akarsu-
yun taşıdığı katı maddelerin önce iri malzemeleri çöker. Daha sonra biraz daha ince olan kum ve çakıl gibi malzemeler baraj gölünün menba kesiminde çöker ve bu çökelmeler delta oluşturur. Kil ve silt iriliğindeki malzemeler ise baraj gölünde akmaya devam eder ve baraj gövdesine yakın bölgede çökerler. Böylece barajlarda üç türlü yığılma söz konusu olur.

- 1- Suyun kabardığı akarsu kesimindeki yığılmalar,
- 2- Kum ve çakılın oluşturduğu deltalar,
- 3- Kil ve siltin oluşturduğu taban yığılmaları.

Haznenin toprakla dolmasında, su yüzünün ve tabanın profillerinin nicelik olarak belirlenmesi önemlidir. Olayı matematik olarak inceleyen metotlar; su ve katı madde denklemlerinin birlikte çözüldüğü modeller ve suyun kabarması etkisinden faydalanan modellerdir (Ağırlioğlu, 2004).

Katı madde tuzaklama oranı barajın etkili işletilmesinde önemli bir role sahiptir. Onun için, geçmiş yıllarda tuzaklama oranını belirleyen çeşitli metotlar geliştirilmiştir. Brown (1943), hazne kapasitesini havza alanına oranlayarak tuzaklama oranını hesaplamıştır. Churchill (1948), suyun tutulma zamanı ve ortalama hız arasındaki ilişkiyi bir diyagramla göstermiştir. Brune (1953), tutulan katı madde miktarı ve hazne hacmi oranı ile yıllık ortalama debi oranı arasında ampirik bir bağıntı geliştirmiştir.

Literatürde, hazne sedimantasyonu veya hazne mühendisliği başlıkları altında son dönemde çeşitli yayınlar yayınlanmıştır; Annandale (1987), Fan ve Morris (1992), Morris ve Fan (1997), Vischer ve Hager(1998), El-Manadely ve diğerleri (2002), Gosschalk (2003).

Akarsu deltası oluşumu ile ilgili sayısal ve deneysel çalışmalar da yapılmıştır. Hotchkiss ve Parker (1991), delta hesaplamaları için bir model geliştirmişlerdir. De Cesare ve diğerleri (2001), haznelerde türbülanslı akımlardan dolayı oluşan yığılmalar ile ilgili sayısal model kurmuşlardır. Kostic ve Parker (2003), üst eğim, ön eğim ve taban eğimi kesişim noktaları için bir model geliştirmişlerdir. Tarela ve Menendez (1999), haznedeki sedimantasyon hesaplamaları için iki boyutlu bir model sunmuşlardır. Toniolo ve Schultz (2005), haznelerdeki tuzaklama oranı hesaplamaları ile ilgili deneysel çalışma yapmışlardır.

Dalmış akım şartları da bir çok araştırmacı tarafından incelenmiştir; (Singh ve Shah, 1971; Akiyama ve Stefan, 1984; Farrell ve Stefan, 1986; Akiyama ve Stefan, 1987). Baraj haznelerindeki türbülanslı akımlarla ilgili sayısal ve deneysel çalışma yapılmıştır; (Bell, 1942; Lee ve Yu, 1997; Yu vd., 2000). Haznelerdeki katı madde dağılımı çeşitli açılardan araştırılmaya çalışılmıştır (Graf, 1983).

Akarsu deltasının geometrik durumu

Şekil 1’de gösterildiği gibi akarsudan gelen katı madde, akarsu çıkış ağzında radyal genişleyerek simetrik bir dağılım yapmaktadır. Bu şekilde akarsu yönündeki eksen “r” ile gösterilmiştir.

Katı madde dağılımı, genişliği B_c olan bir akarsu yatağında oluşmaktadır. Dolayısıyla katı madde dağılımı, genişliği B_f olan radyal bir alan içinde oluşmaktadır.

$$B_f = \theta_f r \quad (1)$$

Burada, θ_f radyal genişleme açısını temsil etmektedir.

Akarsu deltası oluşumu iki açıdan incelenmiştir. Birinci durumda, akarsu taban genişliğinin bütün akarsu boyunca değişmediği, akarsu yatağının ise düz olduğu kabul edilmiştir. İkinci durumda ise akarsu genişliğinin bir akarsu dolu yatak Shields kriterine bağlı olarak değiştiği ve kıvrımlı bir akarsu yatağı için delta oluşumu hesaplanmıştır.

Şekil 1’de gösterildiği gibi katı madde başlangıç noktası $r = 0$, radyal genişleme açısının tepe noktasıdır. Üst eğim ile ön eğimin kesişim noktası $(\eta, r) = (\eta_s, r_s)$ olarak gösterilmiştir. Burada η taban yüksekliği, r ise merkez noktasına olan radyal uzaklıktır. Ön eğim ile taban eğimi kesişim noktası benzer şekilde (η_b, r_b) ile gösterilmiştir. Su yüzeyi yüksekliği ξ , analizlerde sabit alınmıştır. Son olarak, akarsu deltasının eğimi S_{bb} , olan mevcut bir yatak üzerinde olduğu kabulü yapılmıştır.

İki noktada hareketli sınır şartı bulunmaktadır. Bunlar üst eğim - ön eğimi kesişme noktası $r = r_s(t)$ ve alt eğim – taban eğimi kesişme noktası $r = r_b(t)$ noktalarıdır

Sabit tabanlı bir akarsuda delta oluşumu

Bu analizde yarı kararlı akım yaklaşımı kullanılmıştır. Hareketli tabanlı akarsularda akım denklemleri:

$$q_w = UH \quad (2)$$

$$\frac{d}{dr}(U^2 H) = -gH \frac{dH}{dr} + gHS - C_f U^2 \quad (3)$$

şeklinde yazılabilir.

Burada, r : akarsu yönü eksen, g : yerçekimi ivmesi, U : akım hızı, H : akım derinliği, q_w : birim genişlikten geçen debi, S : taban eğimi, C_f : taban sürtünme katsayısıdır.

Buradaki taban eğimi şöyle tanımlanabilir.

$$S = -\frac{d\eta}{dr} \quad (4)$$

Burada, η : akarsu tabanının karşılaştırma düzlemine olan yüksekliğidir.

Taban sürtünme katsayısı ile Chezy sürtünme katsayısı arasındaki ilişki aşağıdaki bağıntıda belirtilmiştir.

$$C_f = C_z^{-2} \quad (5)$$

Denklemlerin sayısal çözümlerinde sürtünme katsayısı sabit alınmıştır. Dolayısıyla;

$$\tau_b = \rho C_f U^2 \quad (6)$$

Burada, ρ suyun özgül ağırlığı, τ_b ise taban kayma gerilmesidir.

(1), (2) ve (3) denklemleri aşağıdaki şekle dönüştürülebilir.

$$U = \frac{q_w}{H} \quad (7)$$

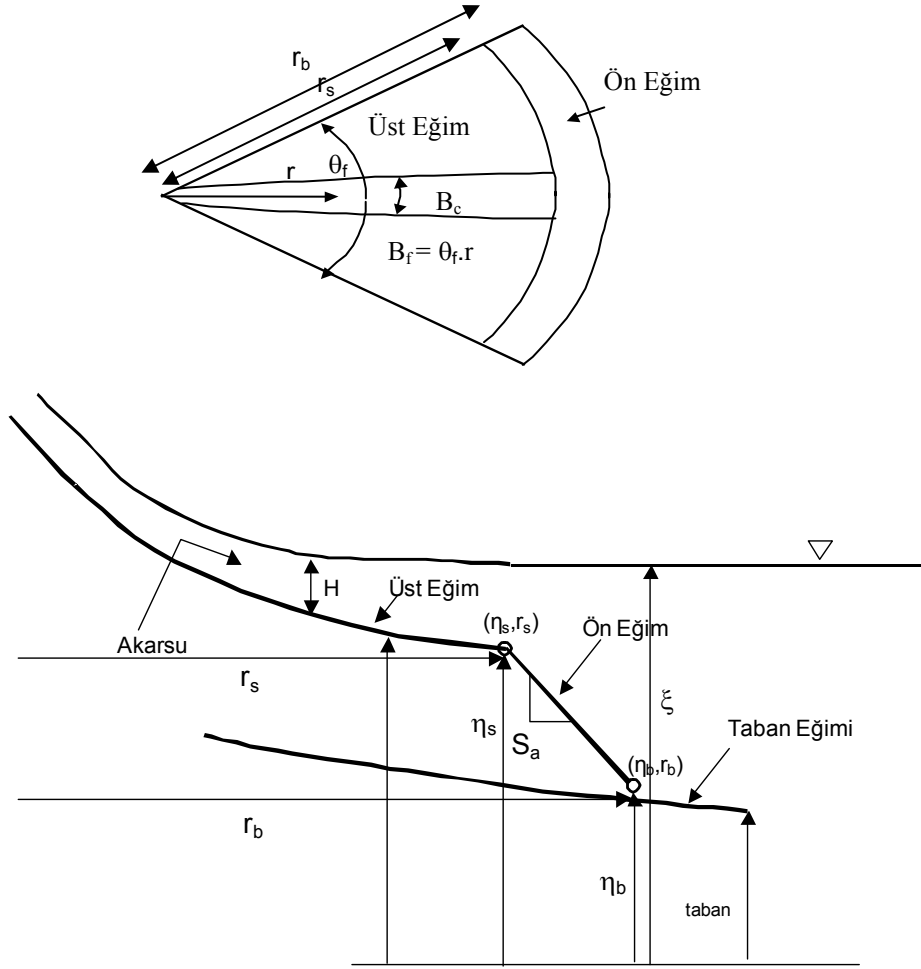
$$\frac{dH}{dr} = \frac{S - S_f}{1 - Fr^2} \quad (8)$$

Burada geçen Froude sayısı ve hidrolik eğim terimleri aşağıda tanımlanmıştır.

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gH}} \quad (9)$$

$$S_f = C_f Fr^2 \quad (10)$$

Çalışmada akarsu akımının nehir rejiminde olduğu kabul edilmiştir, yani $Fr < 1$ alınmıştır.



Şekil 1. Akarsu çıkış ağzında delta oluşumu

Böylece (8) denklemindeki sınır şartı belirli bir H derinliğinde $r = r_s$, noktasında,

$$H|_{r_s} = \xi - \eta_s \quad (11)$$

olur.

Burada $\eta_s = \eta(r_s, t)$.

Hareketli tabanlı bölgede katı madde süreklilik denklemi aşağıdaki şekli alır.

$$(1 - \lambda_p) \theta_f r \frac{\partial \eta}{\partial t} = -B_c \frac{\partial I q_t}{\partial r} \quad (12)$$

Burada, λ_p :katı madde porozitesi, t : zaman, I : katı madde süreklilik katsayısı ve q_t : toplam katı madde debisidir.

Bu çalışmada aşağıdaki sürüntü maddesi bağıntısı kullanılmıştır.

$$q^* = \alpha_t (\tau^* - \tau_c^*)^{n_t} \quad (13)$$

Burada, α_t ve n_t belirli parametreler, τ_c^* hareketin başlangıcındaki kritik kayma gerilmesidir, q^* ve τ^* ise aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$q^* = \frac{q_t}{\sqrt{RgDD}} \quad (14)$$

$$\tau^* = \frac{\tau_b}{\rho RgD} \quad (15)$$

Burada, R , katı maddenin su içindeki yoğunluğudur.

$$R = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad (16)$$

Toplam katı madde ilişkisi için

$$\alpha_t = \frac{0.05}{C_f} \quad ; \quad n_t = 2.5 \quad ; \quad \tau_c^* = 0 \quad (17)$$

alınmıştır.

(12) denklemi $t=0$ başlangıç şartına, $r = 0$ memba sınır şartına ve üst eğim şok şartına göre çözülebilir.

Ön eğim boyunca şok şartı

Katı madde süreklilik denkleminin ön eğim boyunca integrali alındığında aşağıdaki şok bağıntısı elde edilir.

$$(1 - \lambda_p) \theta_f \int_{r_s}^{r_b} r \frac{\partial \eta}{\partial t} dr = -B_c \int_{r_s}^{r_b} \frac{\partial I q_t}{\partial r} dr \quad (18)$$

Ön eğimin tabanında sınır şartı şöyle yazılabilir.

$$q_t|_{r_b} = 0 \quad (19)$$

Ön eğim boyunca taban profili aşağıda tanımlanmıştır.

$$\eta = \eta_s - S_a (r - r_s) \quad (20)$$

Burada

$$\eta_s \equiv \eta[r_s(t), t] \quad (21)$$

olur. Böylece (20) ve (21) denklemlerinden aşağıdaki bağıntılar bulunur.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \Big|_{r_s} - S_{fs} \dot{r}_s + S_a \dot{r}_s \quad (22)$$

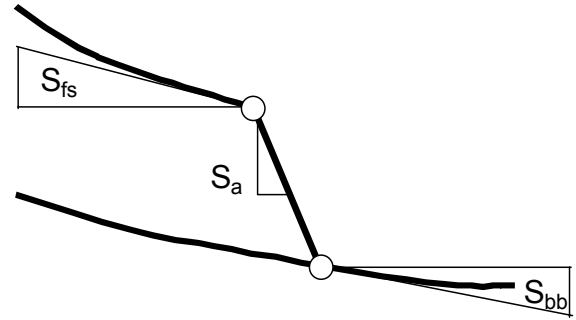
$$S_{fs} = - \frac{\partial \eta}{\partial r} \Big|_{r_s} \quad (23)$$

Burada, S_{fs} Şekil 2'de gösterildiği gibi üst eğim ile ön eğimin kesişme noktasındaki akarsu eği-

midir. (18), (19), (22) ve (23) denklemlerinden şok şartı aşağıdaki gibi bulunur.

$$\frac{1}{2} (r_b^2 - r_s^2) \theta_f \left[\frac{\partial \eta}{\partial t} \Big|_{r_s} + (S_a - S_{fs}) \dot{r}_s \right] = \frac{IB_c q_{ts}}{(1 - \lambda_p)} \quad (24)$$

$$q_{ts} \equiv q_t|_{r_s} \quad (25)$$



Şekil 2. Üst eğim, ön eğim ve taban yığılma eğimi

Ön eğim ile taban eğiminin kesişme noktası hareket şartı

(η_b , r_b) ve (η_s , r_s) parametreleri süreklilik şartından şöyle yazılabilir.

$$\eta_b = \eta_s - S_a (r_b - r_s) \quad (26)$$

Daha önce η_s (21)'de tanımlanmıştı. Aynı şekilde η_b de aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$\eta_b \equiv \eta_b[r_b(t), t] \quad (27)$$

Burada, $\eta_b(r, t)$ su kütesinin oluşturduğu delta'nın taban profilinin eksenidir. (26) denkleminde her iki tarafın zamanla türevi alındığında, (21) ve (22) denklemleri arasında η_b 'nin de aynı şekilde zamanla türevi alındığında aşağıdaki denklem bulunur.

$$\frac{\partial \eta_b}{\partial t} \Big|_{r_b} - S_{bb} \dot{r}_b = \frac{\partial \eta}{\partial t} \Big|_{r_s} - S_{fs} \dot{r}_s - S_a (\dot{r}_b - \dot{r}_s) \quad (28)$$

Burada geçen akarsu taban eğimi S_{bb} şu şekilde tanımlanabilir:

$$S_{bb} = -\frac{\partial \eta_b}{\partial r} \Big|_{r_b} \quad (29)$$

Bu çalışmada durgun suyun taban profilinin zamanla değişmediği kabul edilmiştir, yani

$$\eta_b = \eta_b(r) \quad (30)$$

olur. Böylece (28) bağıntısı aşağıdaki şekle dönüşür.

$$-S_{bb}\dot{r}_b = \frac{\partial \eta}{\partial t} \Big|_{r_s} - S_{fs}\dot{r}_s - S_a(\dot{r}_b - \dot{r}_s) \quad (31)$$

Yukarıdaki bağıntı herhangi bir su kütlesinin taban profili için geçerlidir. Akarsu taban eğimi, S_{bb} , bu çalışmada sabit alınmıştır.

Hareketli sınır şartı bağıntıları

Hareketli tabanlı bölgede, $0 < r < r_s$, aşağıdaki dönüşümler yapılırsa,

$$\hat{t} = t \quad \hat{r} = \frac{r}{r_s} \quad (32)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \hat{t}} - \hat{r} \frac{\dot{r}_s}{r_s} \frac{\partial}{\partial \hat{r}} \quad \frac{\partial}{\partial r} = \frac{1}{r_s} \frac{\partial}{\partial \hat{r}} \quad (33)$$

elde edilir. Suyun kabarma denklemi,

$$\frac{dH}{d\hat{r}} = \frac{S - S_f}{1 - Fr^2} r_s \quad (34)$$

Süreklilik denklemi ise,

$$(1 - \lambda_p) \theta_f r_s \hat{r} \left(\frac{\partial \eta}{\partial \hat{t}} - \hat{r} \frac{\dot{r}_s}{r_s} \frac{\partial \eta}{\partial \hat{r}} \right) = -\frac{IB_c}{r_s} \frac{\partial q_t}{\partial \hat{r}} \quad (35)$$

olur.

(24) şok şartı denklemi (33) denklemi yardımıyla aşağıdaki şekle dönüşür.

$$\dot{r}_s = \frac{1}{S_a} \left[-\frac{\partial \eta}{\partial \hat{t}} \Big|_{\hat{r}=1} + \frac{1}{2} \theta_f (r_b^2 - r_s^2) (1 - \lambda_p) \right] \quad (36)$$

(31) şartı aynı şekilde (33) yardımıyla aşağıdaki şekli alır.

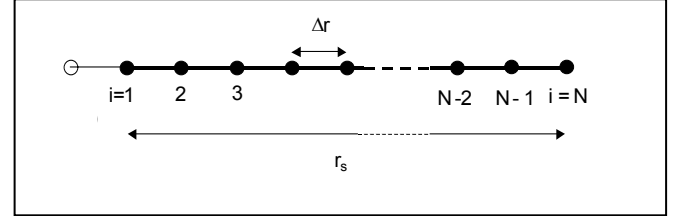
$$\dot{r}_b = \frac{S_a}{S_a - S_{bb}} \dot{r}_s + \frac{1}{S_a - S_{bb}} \frac{\partial \eta}{\partial \hat{t}} \Big|_{\hat{r}=1} \quad (37)$$

Sayısal yaklaşım

Şekil 3'te gösterildiği gibi çalışma alanı uzunluğu $r_s(t)$ ile gösterilirse, çözüm alanı $0 \leq \hat{r} \leq 1$ arasında oluşur. Bu bölge her birinin uzunluğu $\Delta \hat{r}$ olan N alt bölgeye ayrılırsa aşağıdaki boyutsuz büyüklükler kullanılabilir.

$$\Delta \hat{r} = \frac{1}{N} \quad (38)$$

$$\Delta r = \frac{r_s}{N} \quad (39)$$



Şekil 3. Akarsu ağızı delta oluşumu için sayısal yaklaşım

Böylece $N+1$ nokta tanımlanmış olur. Bu noktaların başlangıcı $r = 0$ noktasıdır, hâlbuki bu radyal genişlemenin tepe noktasıdır, hesaplamalarda kullanılamaz, çünkü bu noktada temel denklem tekil olur. Bunun yerine, bu nokta bir hayali nokta olarak alınacaktır. Bu ise katı maddenin beslendiği noktadır. Yükseklik noktaları $i = 1$ 'den $i = N$ 'e kadar uzar.

$$\hat{r}_i = i \Delta \hat{r}, i = 1..N \quad (40)$$

$$r_i = \hat{r}_i r_s(t), i = 1..N \quad (41)$$

Üst eğim ile ön eğim kesişim noktası r_{sl} , ve akarsu başlangıç eğimi S_{fbl} ile gösterilirse, başlangıç taban yükseklikleri η_i

$$\eta_i = \eta_{sl} + S_{fbl}r_{sl}(1 - \hat{r}_i), \quad i = 1..N \quad (42)$$

olur.

Yukarıdaki analizde η_s noktası ile uyumlu olan η_N noktası, üst eğim-ön eğim kırılma noktası olur. Bu parametrenin başlangıç şartı η_{sl} ile gösterilmiştir. Ön eğim ile taban eğimi kesişme noktası η_b ise programda η_{N+1} noktasına denk gelmektedir. Bu parametrenin başlangıç değeri η_{bl} ile gösterilmiştir. Ön eğim ile taban eğimi kesişim noktası, r_b , programda x_{N+1} noktasına denk gelmektedir. Başlangıç değeri ise;

$$r_{bl} = r_{sl} + \frac{\eta_{sl} - \eta_{bl}}{S_a} \quad (43)$$

olur.

Değişken tabanlı akarsularda delta oluşumu

Akarsu taban genişliğinin değişken olması durumunda oluşan delta profilleri incelenmiştir.

Genellikle, Shields gerilmesi τ_{bf}^* , çakıl tabanlı akarsularda 0.05 ve kum tabanlı akarsularda 1.8 değerini almaktadır (Kostic ve Parker, 2003). Bu çalışmada katı maddenin çakıl ve kum karışımı olduğu esas alınmıştır.

Bu kısımda ele alınan akarsuyun doğal bir akarsu olduğu ve dolayısıyla sinüzoidal bir şekilde olabileceği göz önünde tutulmuştur. Bunu hesaplamalarda dikkate alabilmek için (1) deki r eksen r_c ile değiştirilmiştir. Dolayısıyla her iki eksen arasındaki ilişki;

$$r_c = \Omega r \quad (44)$$

olur.

Böylece (3) denkleminde ($r \rightarrow r_c$ yer değiştirmeyle) aşağıdaki denklem elde edilir.

$$U \frac{dU}{dr} = -g \frac{dH}{dr} + \Omega \left(gS - \frac{\tau_b}{\rho H} \right) \quad (45)$$

(6) ve (15) denklemleri yardımıyla akarsu dolu akım Shields kriteri τ_{bf}^* yaklaşımı uygulanırsa,

$$\tau_b = \rho C_f U^2 = \rho RgD \tau_{bf}^* \quad (46)$$

olur.

(46) denklemini aşağıdaki şekle kolaylıkla dönüştürülebilir.

$$\frac{U}{\sqrt{RgD}} = \sqrt{\frac{\tau_{bf}^*}{C_f}} \quad (47)$$

Taban sürtünme katsayısı sabit alınırsa yukarıdaki denklemde de görüldüğü gibi akımın hızı kanal boyunca sabit olur.

Akarsu yatağı kıvrımlılık katsayısı (Ω) birden büyük olan bir sinüzoidal şekilde olduğunda (46) ve (47) denklemleri (45) denkleminde yerine yerleştirilirse, kabarma denklemi aşağıdaki şekle dönüşür.

$$\frac{dH}{dr} = \Omega \left(S - R \frac{D}{H} \tau_{bf}^* \right) \quad (48)$$

Burada, S ;

$$S = -\frac{\partial \eta}{\partial r_c} = -\frac{1}{\Omega} \frac{\partial \eta}{\partial r} \quad (49)$$

olur.

Akarsu debisi, Q_w ile toplam katı madde debisi, Q_t için korunum şartlarına göre

$$Q_w = q_w B_c \quad (50)$$

$$Q_t = q_t B_c \quad (51)$$

(3) ve (13) bağıntıları yardımıyla

$$Q_w = \sqrt{RgD} \sqrt{\frac{\tau_{bf}^*}{C_f}} B_c H \quad (52)$$

$$Q_t = \sqrt{RgD} D \alpha_t (\tau_{bf}^* - \tau_c^*)^{n_t} B_c \quad (53)$$

olur.

Yukarıdaki iki denklem sadeleştirilirse

$$\frac{Q_t}{Q_w} = \sqrt{\frac{C_f}{\tau_{bf}^*}} \left(\frac{H}{D}\right)^{-1} \alpha_t (\tau_{bf}^* - \tau_c^*)^{n_t} \quad (54)$$

denklemini elde edilir.

Katı madde süreklilik denklemi (44) bağıntısı yardımıyla

$$(1 - \lambda_p) \theta_f r \Omega \frac{\partial \eta}{\partial t} = -I \frac{\partial Q_t}{\partial r} \quad (55)$$

olur.

Sabit tabanlı bir akarsuda açıklanan hareketli sınır şartları değişken tabanlı akarsular için de geçerlidir. Sadece (34), (35), ve (36) denklemleri aşağıdaki şekle dönüşür.

$$\frac{dH}{d\hat{r}} = -\frac{d\eta}{d\hat{r}} - r_s \Omega R \frac{D}{H} \tau_{bf}^* \quad (56)$$

$$(1 - \lambda_p) \theta_f r_s \hat{r} \left(\frac{\partial \eta}{\partial \hat{t}} - \hat{r} \frac{\dot{r}_s}{r_s} \frac{\partial \eta}{\partial \hat{r}} \right) = -\frac{I}{\Omega r_s} \frac{\partial Q_t}{\partial \hat{r}} \quad (57)$$

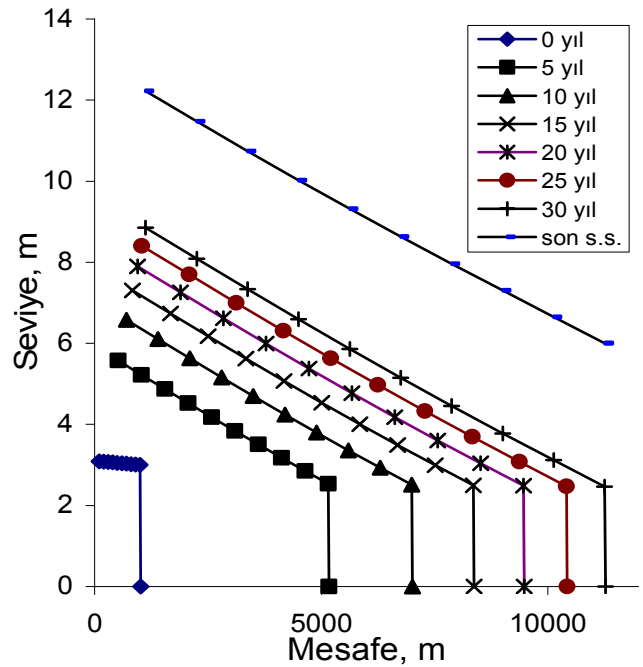
$$\dot{r}_s = \frac{1}{S_a} \left[-\frac{\partial \eta}{\partial \hat{t}} \Big|_{\hat{r}=1} + \frac{1}{\frac{1}{2} \theta_f (r_b^2 - r_s^2) (1 - \lambda_p)} \frac{IQ_{ts}}{\Omega} \right] \quad (58)$$

Yukarıdaki denklemler türetildiklerinde alt eğim boyunca akarsu yatağının kıvrımlılığı $\Omega = 1$ alınmıştır.

Uygulamalar ve değerlendirmeler

İki boyutlu radyal genişleyen bir akarsu çıkış ağzında oluşan delta için VISUAL BASIC prog-

ramlama dilinde bir program hazırlanmıştır. Program için şu verilerin tanımlanması gerekir: katı madde miktarı ve hidrolik direnç ile ilgili boyutsuz parametreler; α_t , n_t , τ_c^* , C_z , su ve katı madde ile ilgili parametreler; D , R , λ_p , q_w , $q_{to}(t)$, I ve geometrik parametreler; B_c , S_a , $\xi(t)$, $\eta_b(x)$. Ayrıca, bu parametrelere ek olarak başlangıç şartının tanımlanması gerekir; r_{sl} , S_{fbl} , η_{sl} , η_{bl} . Sabit tabanlı ve düz bir akarsuyun durgun bir su ortamıyla birleşmesi durumunda meydana gelen delta profilleri Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi zaman arttıkça akarsuyun taşıyacağı katı madde miktarı da artacağından delta profilleri daha uzak mesafede ve daha yüksekte oluşmuştur.

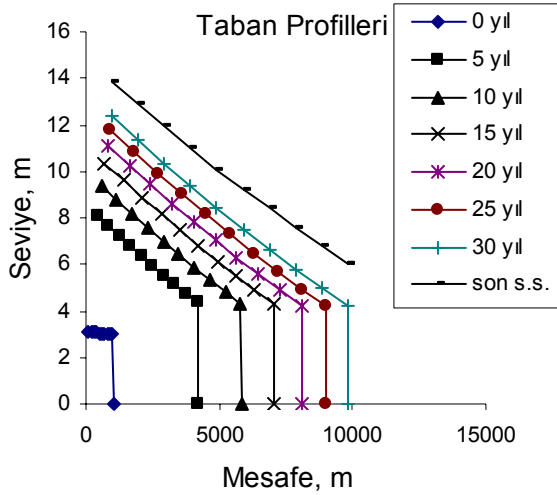


Şekil 4. Sabit tabanlı akarsu taban profilleri
($B_c = \text{Sabit}$, $t = 30$ yıl)

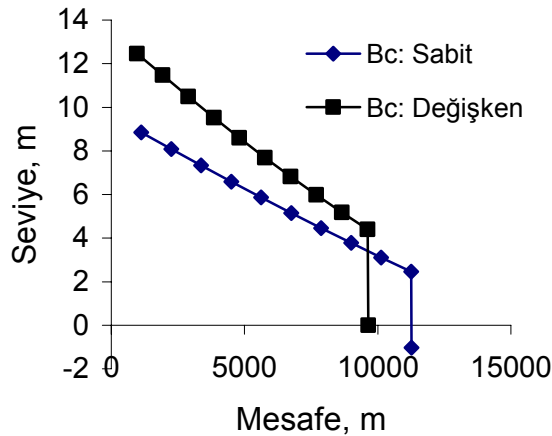
Değişken tabanlı bir akarsu için oluşan delta benzer şekilde bulunmuştur. Burada program girdisine ek olarak akarsuyun kıvrımlılığının da tanımlanması gerekir. Çünkü düz bir akarsu yerine sinüzoidal değişen bir akarsu için meydana gelen delta profilleri hesaplanmıştır. Hesaplanan profiller Şekil 5'te gösterilmiştir.

Akarsu yatağının düz veya kıvrımlı olması, akarsu deltası oluşumu için önemli etkenlerden

bir tanesidir. Dolayısıyla her iki durum için ayrı ayrı uygulama yapılmıştır. Akarsu deltası profilleri $t = 30$ yıl için karşılaştırılıp Şekil 6'da gösterilmiştir. Buna göre sabit tabanlı bir akarsuda delta oluşumu daha kısa fakat daha yukarıda gerçekleşmiştir. Değişken tabanlı akarsuda delta oluşumu daha uzun mesafede fakat daha aşağıda gerçekleşmiştir. Başka bir ifadeyle değişken tabanlı bir akarsuda delta ön eğimi sabit tabanlı akarsu durumuna göre daha dik oluşmuştur.



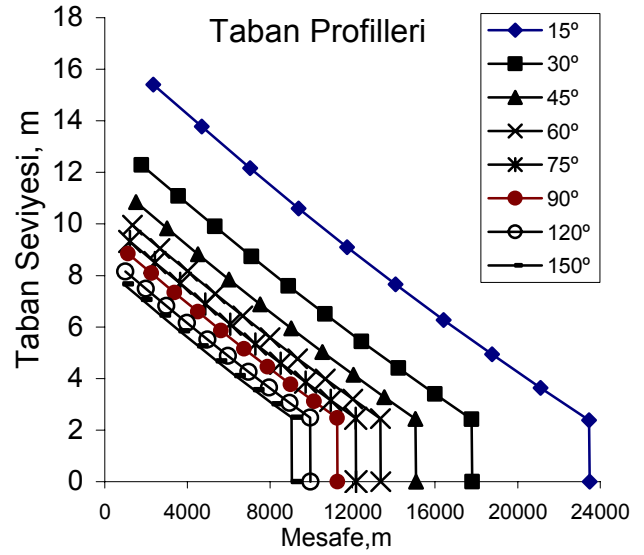
Şekil 5. Değişken tabanlı akarsu taban profilleri ($B_c = \text{değişken}$, $t = 30$ yıl)



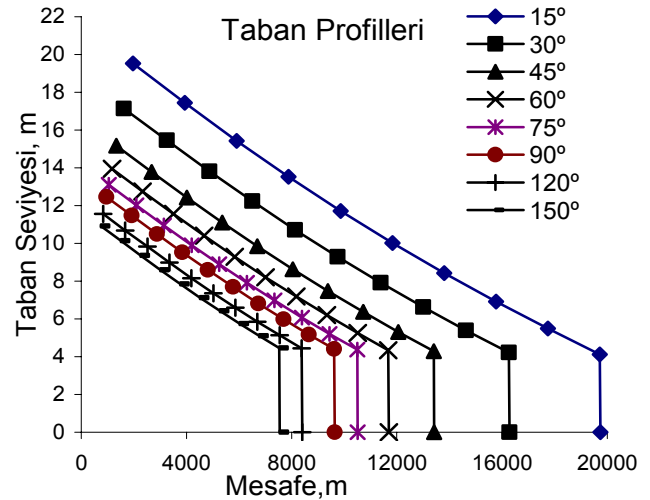
Şekil 6. Sabit ve değişken tabanlı akarsu taban profillerinin karşılaştırılması ($t = 30$ yıl)

Radyal genişleme açısının akarsu deltasına etkisini hesaplamak için değişik açılar ve değişik zaman dilimleri kullanılmıştır. Programın çalıştırılmasından sonra elde edilen taban profilleri

30 yıllık bir zaman dilimi için gösterilmiştir. Sabit ve değişken tabanlı bir akarsuda oluşan taban profilleri Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir.



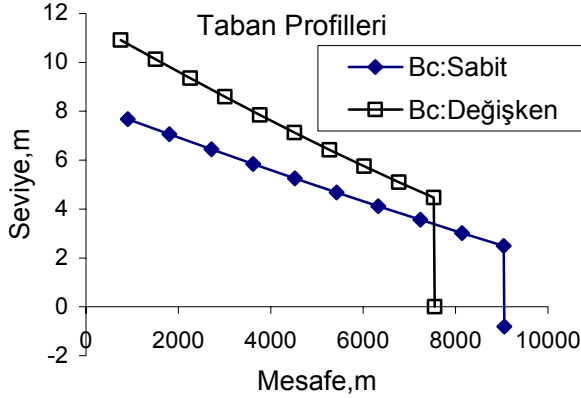
Şekil 7. Sabit tabanlı akarsuda radyal genişleme açısının etkisi ($t = 30$ yıl)



Şekil 8. Değişken tabanlı akarsuda radyal genişleme açısının etkisi ($t = 30$ yıl)

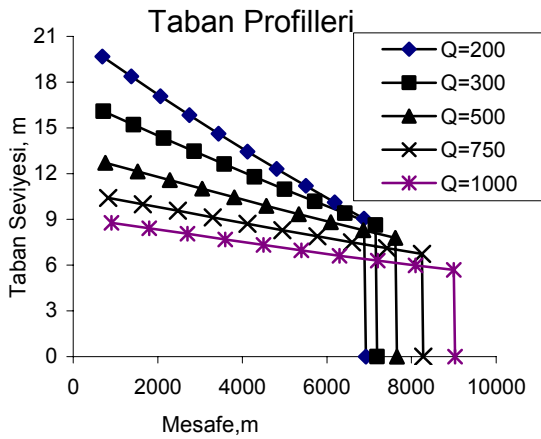
Sabit tabanlı bir akarsu ile değişken tabanlı bir akarsuda radyal genişleme açısının etkisini görebilmek için $t = 30$ yıl ve $\theta_f = 150^\circ$ için bir karşılaştırma yapılmış ve Şekil 9'da gösterilmiştir. Şekilde de gösterildiği gibi akarsu taban genişliği sabit olduğunda akarsuyun oluşturduğu taban daha uzun bir mesafede gerçekleşmiştir. Başka bir ifadeyle radyal modellemede değişken

tabanlı akarsuyun üst eğimi sabit tabanlı akarsu durumuna göre daha dik olmuştur.



Şekil 9. Değişken ve sabit tabanlı akarsuda $\theta_f=150^\circ$ ve $t=30$ yıl için taban profillerinin karşılaştırılması

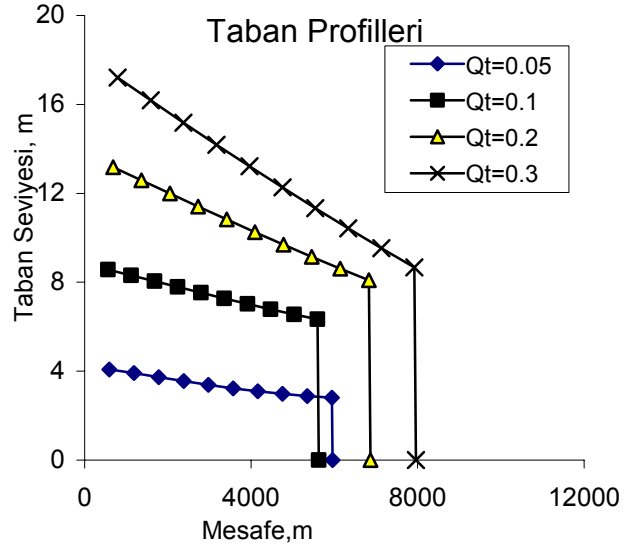
Akarsular üzerinde yapılan çeşitli düzenleme yapıları ve mevsimsel değişimlerden dolayı akarsu debisinde meydana gelen değişimlerin akarsu deltasına etkisi incelenmiştir. Yapılan hesaplamaların sonuçları Şekil 10'da gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi akarsu debisi arttıkça beraberinde taşıyacağı katı maddeyi daha uzak noktaya taşıyacağından delta daha uzun mesafede meydana gelmiştir.



Şekil 10. Değişken tabanlı akarsuda akarsu debisi değişiminin etkisi ($t=30$ yıl)

Akarsular üzerinde yapılan barajlardan dolayı ve akarsu yataklarından alınan kumlardan dolayı akarsuyun taşıdığı katı madde miktarı azalmaktadır. Ayrıca ilkbaharda yağışların artması ve

karın erimesinden dolayı akarsudan taşınan katı madde miktarı artmaktadır. Bu nedenle akarsu yatağında katı madde değişiminin akarsu deltasına etkisi değişik zaman periyotları için araştırılmış ve Şekil 11'de gösterilmiştir.



Şekil 11. Değişken tabanlı akarsuda katı madde debisi değişiminin etkisi ($t=30$ yıl)

Sonuçlar

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Modelde, sabit ve değişken tabanlı bir akarsuyun göl ve baraj haznesi gibi durgun bir su ortamıyla birleşmesi durumunda oluşan delta profilleri başarılı bir şekilde hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalardan da görüldüğü gibi zaman arttıkça akarsuda taşınan katı madde miktarı da artacağından delta profilleri daha uzak mesafede ve daha yüksekte oluşmuştur.
- Uzunlamasına akan bir akarsu yatağı ile kıvrımlı (sinüzoidal) akan bir akarsu yatağının akarsu deltası oluşumuna olan etkisi modelde hesaplanmıştır. Buna göre sabit tabanlı bir akarsuda delta oluşumu daha kısa fakat daha yukarıda gerçekleşmiştir. Değişken tabanlı akarsuda delta oluşumu daha uzun mesafede fakat daha aşağıda gerçekleşmiştir. Başka bir ifadeyle değişken tabanlı bir akarsuda delta ön eğimi daha dik olmuştur.
- Modelde, radyal genişleme açısı ayrı bir inceleme konusu yapılmıştır. Yapılan hesap-

lamalar sonucunda radyal genişleme açısı küçüldükçe delta daha uzun mesafede oluşmuştur. Doğal olarak küçük açılarda suyun katı maddeyi sürüklenme gücü arttığından deltayı oluşturan katı madde daha uzun mesafede oluşmuştur.

- Sabit ve değişken tabanlı bir akarsuda radyal genişleme açısı karşılaştırılmıştır. $t = 30$ yıl ve $\theta_f = 150^\circ$ için yapılan karşılaştırmada da görüldüğü gibi değişken tabanlı bir akarsuda delta oluşumu daha kısa ve daha yukardadır.
- Modelde, mevsimsel değişimler ve akarsu üzerinde yapılan çeşitli düzenleme yapıları nedeniyle akarsu debisi değişiminin delta oluşumuna etkisi de araştırılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda akarsu debisi arttıkça beraberinde taşıdığı katı madde de arttığından delta daha uzun mesafede meydana gelmiştir.
- Genel olarak akarsuyun akış rejimini ve katı madde taşıma kapasitesini değiştiren bir düzenleme yapısı akarsudaki tabii dengeyi bozar. Akarsu katı madde debisinde meydana gelen değişimin deltaya etkisi ayrıca incelenmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda katı madde debisi arttıkça daha büyük bir delta meydana gelmiştir.

Kaynaklar

- Ağırlioğlu N., (2004). *Baraj Planlama ve Tasarımı 1*, Su Vakfı Yayınları, İstanbul.
- Annandale G., (1987). Development in Water Science, Elsevier, New York, 29.
- Akiyama J. ve Stefan H., (1984). plunging flow into a reservoir: Theory, *Journal of Hydraulics Engineering*, 10, 484–99.
- Akiyama J. ve Stefan H., (1987). Onset of underflow in slightly diverging channels, *Journal of Hydraulics Engineering*, 113, 825–844.
- Bell H. S., (1942). Stratified flow in reservoirs and its use in preventing silting, *Miscellaneous Publication*, US Department of Agriculture, Washington DC, 491.
- Brown C., (1943). Discussion of sedimentation in reservoirs, *Proceedings ASCE*, 69, 793–815.
- Brune G., (1953). Trap efficiency of reservoirs, *Transaction American Geophysics. Union*, 34, 407–418.
- Churchill M., (1948). Discussion of analysis and use of reservoir sedimentation Data by L. Gottschalk *Proceedings of the Federal Interagency Sedimentation Conference*; Denver, Colorado. Bureau of Reclamation – US Department of Interior, Washington DC.
- De Cesare G., Schleiss A. ve Hermann F., (2001). Impact of turbidity currents on reservoir sedimentation, *Journal of Hydraulics Engineering*, 127, 6–16.
- El-Manadely M., Abdel-Bary R., El-Sammany M. ve Ahmed T., (2002). Characteristics of the delta formation resulting from sediment deposition in Lake Nasser, Egypt: Approach to tracing lake delta formation, *Lakes and Reservoir: Research and Management*, 7, 81–86.
- Fan J. ve Morris G., (1992). Reservoir sedimentation I: Delta density current deposits, *Journal of Hydraulics Engineering*, 118, 354–69.
- Farrell G. J. ve Stefan H., (1986). Mathematical Modeling of Plunging Reservoir flows, *Journal of Hydraulics Research*, 26, 525–37.
- Graf H. W., (1983). The hydraulics of reservoir sedimentation, *Water Power Dam Construction*, 35, 45–52.
- Gosschalk E., (2003). *Reservoir Engineering: Guidelines for Practice*, Thomas Telford, London.
- Hotchkiss R. H. ve Parker G., (1991). Shock fitting of aggradational profiles due to backwater, *Journal of Hydraulics Engineering*, 117, 1129–1144.
- Kostic, S. ve Parker G., (2003). Progradational sand-mud deltas in lakes and reservoirs. Part 1. Theory and Numerical Modeling, *Journal of Hydraulics Research*, 41, 127–140.
- Lee H. ve Yu W., (1997). Experimental study of reservoir turbidity current. *Journal of Hydraulics Engineering*, 123, 520–528.
- Morris G. ve Fan J., (1997). *Reservoir Sedimentation Handbook*. McGraw-Hill, New York.
- Singh B. ve Shah C. R., (1971). Plunging phenomenon of density currents in reservoirs, *La Houille Blanche*, 26, 59–64.
- Tarela P. ve Menendez A., (1999). A model to predict reservoir sedimentation, *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 4, 121–33.
- Toniolo H. ve Schultz J., (2005). Experiments on Sediment trap efficiency in reservoirs, *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 10, 13–24.
- Vischer D. ve Hager W., (1998). *Dam Hydraulics*, John Wiley & Sons, New York.
- Yu W., Lee H. ve Hsu S., (2000). Experiments on deposition behavior of fine sediment in a reservoir, *Journal of Hydraulics Engineering*, 126, 912–20.